

Calcinierte Tone als Puzzolane der Zukunft – Von den Rohstoffen bis zur Wirkung im Beton

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
an der Fakultät Bauingenieurwesen der Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von
M. Sc. André Trümer
geboren am 22.03.1985 in Brandenburg an der Havel

Gutachter:

1. Prof. Dr.-Ing. Horst-Michael Ludwig
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl-Christian Thienel
3. Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz

Eingereicht am: 28.06.2019

Tag der Disputation: 28.01.2020

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XIII
Tabellenverzeichnis	XVII
Abkürzungsverzeichnis	XIX
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	7
2.1 Charakteristik der Tone	7
2.1.1 Tone	7
2.1.2 Tonminerale	8
2.1.3 Spezielle Tonmineralogie	11
2.1.4 Nebenbestandteile	18
2.2 Calcinierte Tone als puzzolanisches Material	19
2.2.1 Herkömmliche Puzzolane für den Einsatz in Zement und Beton	19
2.2.2 Calciniertes Ton in Form von Metakaolin	22
2.2.3 Puzzolanität anderer gebrannter Tone	31
3 Untersuchungsprogramm	33
3.1 Grundlagenuntersuchungen an Tonmineralen	35
3.1.1 Materialauswahl und Eingangsuntersuchungen	35
3.1.2 Calciniierung und Analyse der Brennprodukte	36
3.1.3 Lösungsversuche	36
3.1.4 Kalkversuche	37
3.2 Zement- und Betonuntersuchungen an kommerziellen Tonen	38
3.2.1 Materialauswahl und Eingangsuntersuchungen	38
3.2.2 Brennversuche	39
3.2.3 Zementversuche	42
3.2.4 Betonversuche	44
3.3 Analytik	48
3.3.1 Röntgenfluoreszenzanalyse	48
3.3.2 Röntgenbeugungsanalyse	48
3.3.3 Simultane Thermische Analyse	49
3.3.4 Isotherme Differenzkalorimetrie	49
3.3.5 Korngrößenanalyse und Oberflächenbestimmung	49
3.3.6 Kernspinresonanzspektroskopie	50
3.3.7 Elektronenmikroskopie	50
3.3.8 Atomemissionsspektroskopie	51
3.3.9 Thermodynamische Berechnungen	51
4 Grundlagenuntersuchungen an Tonmineralen	53
4.1 Eingangsuntersuchungen	53

4.2	Thermisches Verhalten und Calcinierung	54
4.2.1	Kaolinit	55
4.2.2	Illit	60
4.2.3	Montmorillonit	66
4.3	Bestimmung der Reaktivität im alkalischen Milieu	76
4.3.1	Meta-Kaolinit	76
4.3.2	Meta-Illit	78
4.3.3	Meta-Montmorillonit	78
4.4	Kalkversuche	80
4.4.1	Chapelle-Test	81
4.4.2	Thermodynamische Modellierung	82
4.4.3	Reaktionskinetik	84
4.4.4	Umsatzgrad, Reaktionsprodukte und Festigkeit	85
4.5	Ergebnisübersicht der Grundlagenuntersuchungen	90
5	Zement- und Betonuntersuchungen an kommerziellen Tonen	95
5.1	Eingangsuntersuchungen der kommerziellen Tone	95
5.2	Calcinierung und Bewertung der Brennprodukte (Parameterstudie)	97
5.2.1	Ofeneinstellungen	98
5.2.2	Analyse der Brennprodukte	98
5.2.3	Verarbeitbarkeit und Puzzolanität im Zement	104
5.3	Zementversuche	107
5.3.1	Auswahl der calcinierten Tone	107
5.3.2	Herstellung der Kompositzemente	108
5.3.3	Hydratationsverhalten	109
5.3.4	Prüfung der Zementeigenschaften	128
5.4	Betonversuche	135
5.4.1	Vorversuche	135
5.4.2	Frisch- und Festbetoneigenschaften	139
5.4.3	Versuche zur Beurteilung der Betondauerhaftigkeit	144
5.5	Ergebnisübersicht der Brenn- und Performanceversuche	153
6	Zusammenfassung	161
	Literaturverzeichnis	165
A	Anhang	179
A.1	Verwendete Referenzmaterialien	181
A.2	Zur Thermodynamik der Meta-Kaolinit-Bildung	182
A.3	Grundlagen der Glaschemie	184
A.4	Thermodynamische Modellierung ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)	186
A.5	XRD der kommerziellen Tonrohstoffe	187
A.6	STA der kommerziellen Tonrohstoffe	188
A.7	Thermodynamische Modellierung (Zement)	189
A.8	Thermodynamische Modellierung (Zement)	190
A.9	Thermodynamische Modellierung (Zement)	191
A.10	Thermodynamische Modellierung (Zement)	192

A.11 Thermodynamische Modellierung (Zement)	193
A.12 Thermodynamische Modellierung (Zement)	194
A.13 Thermodynamische Modellierung (Zement)	195
A.14 Wasseranspruch und Erstarren	196
A.15 Schwinden von Beton	197
A.16 Kapillares Saugen in CIF- und CDF-Test	198
A.17 Sulfatwiderstand nach dem SVA-Verfahren	199
A.18 Nomogramm	200